第40卷 第1期
2023年1月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 1
Jan. 2023

林分密度和种植点配置对梭梭人工林防风效应的影响

牛丹妮[1]， 韩 蓉[1]， 马 瑞[1]， 王振亭[2]， 刘虎俊[3]， 魏林源[3]

（1. 甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070；2. 中国科学院西北生态环境资源研究院，甘肃 兰州 730000；
3. 甘肃省治沙研究所，甘肃 兰州 730070）

摘 要：研究不同密度和种植点配置对梭梭人工林防风效应的影响，为优化干旱区防风固沙林结构提供科学依据。以梭梭为原型，利用仿真植物设计了3种密度、4种种植点配置的品字形林带，编号与对应植株的株行距分别为A：17 cm×17 cm，B_1：34 cm×17 cm，B_2：17 cm×34 cm，C：34 cm×34 cm，通过风洞模拟试验，对林带在密度和种植点位发生变化时的流场和防风效应进行了测定分析。结果表明：(1) A、B_1、B_2、C林带的风速减速区（U/U_0<1）的面积分别占流场总面积的78.06%、70.41%、74.36%和82.80%；弱风区（U/U_0<0.4）的面积分别占流场总面积的22.46%、0.73%、5.91%和0；(2) 林分密度越大，冠下平均风速越小，但林带后近地层风速恢复越快，A、B_1、B_2、C林带的最小风速点分别在带后的11H、15H、15H和20H处（H为树高）；(3) 4个林带防风效应从大到小的排序为A>B_2>B_1>C，林带防风效应与林分密度间为非线性关系，林带在带后近地层风速降幅的比例关系为A:B:C≈6:3:2。具体造林时，应根据土壤水分承载力确定造林密度，在此基础上，优先选用“小株距，大行距”的种植点配置方式。

关键词：防风固沙林；梭梭；密度；种植点配置；流场；防风效应；风洞模拟

防风固沙林是以防治风沙危害为目的的防护林，在遏制风沙危害、改善农田微气候、维持生态平衡等方面发挥着重要作用[1-2]。受树种组成及混交方式[3-4]、林分密度[5]或孔隙度[1]、林带宽度[6]、季相[7-10]等因素的影响，不同结构的防风固沙林的防风效应存在显著差异。其中，林分密度是影响纯林防风效应最为重要的因子。对于一个既定树种，植株个体的几何形状和结构是相似的，因此，密度和种植点格局成为影响整个防护林参数，如孔隙率、体积密度、空间流场以及气流格局的重要因子。以空气动力学孔隙度为着眼点的研究表明，高密度低孔隙度会产生高的风速降幅[11]，然而，与较为稀疏的林带相比，孔隙度<20%的林带下风向的风速恢复的较快，防护距离较短，最小风速点位置也更靠近林带[12-13]。考虑到沙区干旱缺水的生境条件，我国学者更关注于对低覆盖度林带的研究[14-16]，并据此提出了低覆盖度治沙理论[17]。然而，由于关注点的不同，对密度与防风效应间的量化关系的研究还有待深入。种植点配置是种植点在造林地上的间距及其排列方式，分行状配置和群状配置2类，其中，行状配置中的品字形配置有利于保持水土和防风固沙，故成为山地和沙区造林中普遍采用的配置方式[18]。关于种植点配置对风速的影响研究目前还未见报道。

梭梭（*Haloxylon ammodendron*）为沙生大灌木或小乔木，是我国北方荒漠区防护林建设的主要树种。上世纪60年代以来，梭梭被大量种植于绿洲外围[19]，以保护绿洲免遭风沙危害，本研究以梭梭林为研究对象，通过风洞仿真模拟试验，对梭梭林在密度和种植点配置发生变化时的流场和防风效应进行研究，以期为防风固沙林建设和防风效应评价提供技术参考和理论依据。

收稿日期：2022-07-01； **修订日期：**2022-08-06
基金项目：国家自然科学基金区域创新发展联合基金（U21A2001）；国家自然科学基金（31460221）；甘肃农业大学导师扶持基金（GAU-QDFC-2020-09）
作者简介：牛丹妮（1996-），女，硕士研究生，主要从事荒漠化防治研究. E-mail: ndn0614@126.com
通讯作者：马瑞. E-mail: mr031103@126.com

1 材料与方法

1.1 试验材料

风洞试验中，满足几何相似对试验结果的影响尤为重要[20]。采用Ma[4]等的方法，以野外壮年期梭梭单株为参照，选用仿真植物模型作为试验材料，通过调节枝角和修剪枝叶的方式调整其空间构型和孔隙度。模型与梭梭植株原型的尺寸比例为1:15。模型的主干和枝条用塑料包裹的铁丝制成，细枝和叶用塑料制成，以保证其在风力作用下能够模拟实际枝叶的摆动。梭梭及仿真植物模型的主要特征参数见表1。

1.2 试验设备

风洞模拟试验在甘肃省治沙研究所“风沙环境风洞实验室”进行，该风洞为直吹式风洞，试验段长16 m，宽1.2 m，高1.2 m，可调风速4~35 m·s^{-1}。本试验利用皮托管测定风压并通过微差压传感器转换为风速，由计算机记录。

1.3 林带设计

在风洞试验段铺设厚4 cm的粗糙木板，木板前缘为流线型，可使气流在爬升过程中平稳过度而不至于发生附面层分离。在没有布设植物模型的情况下，测定到木板上风速达到99%，主流风速的高度约为24 cm，即附面层厚度为24 cm。本试验所采用的仿真植物模型的高度位于附面层范围内，符合风洞试验要求。林带布设在试验段中段，将植物模型的主干底端通过钻孔固定在木板上，使其植入点呈“品”字形布设，试验共设计了3个林分密度，编号分别为A、B、C，其中B密度林带布设为B_1和B_2两种不同的种植点格局(图1)。4个林带对应的株行距分别为A：17 cm×17 cm，B_1：34 cm×17 cm，B_2：17 cm×34 cm，C：34 cm×34 cm，其密度比为A：B_1：B_2：C=4：2：2：1。该设计对应的野外株行距约为A：2.5 m×2.5 m，B_1：5.0 m×2.5 m，B_2：2.5 m×5.0 m，C：5.0 m×5.0 m；对应的实际种植密度约为A=1500株·hm^{-2}，B_1=B_2=750株·hm^{-2}，C=375株·hm^{-2}，盖度约为A=93.0%，B_1=B_2=46.5%，C=23.2%。

1.4 风速测定

林带的流场特征主要受植物个体构型、群体孔隙度、林带宽度等因素的影响，而受风速的影响较小[3,4,6]，据此，本研究选择10 m·s^{-1}的中等风速作为控制风速。在该风速下，沿风洞中轴线在林带前−4H至林带后25H的范围内布设测点，H为模型植物的高度，H=20 cm。测点分布见图2。在各测点测定了9个高度(1 cm、3 cm、5 cm、8 cm、13 cm、20 cm、30 cm、40 cm和60 cm)的水平风速。每个测点测定不少于100个瞬时风速，历时约1 min，对所得数据取均值。以无植物时测定的风速作为对照。

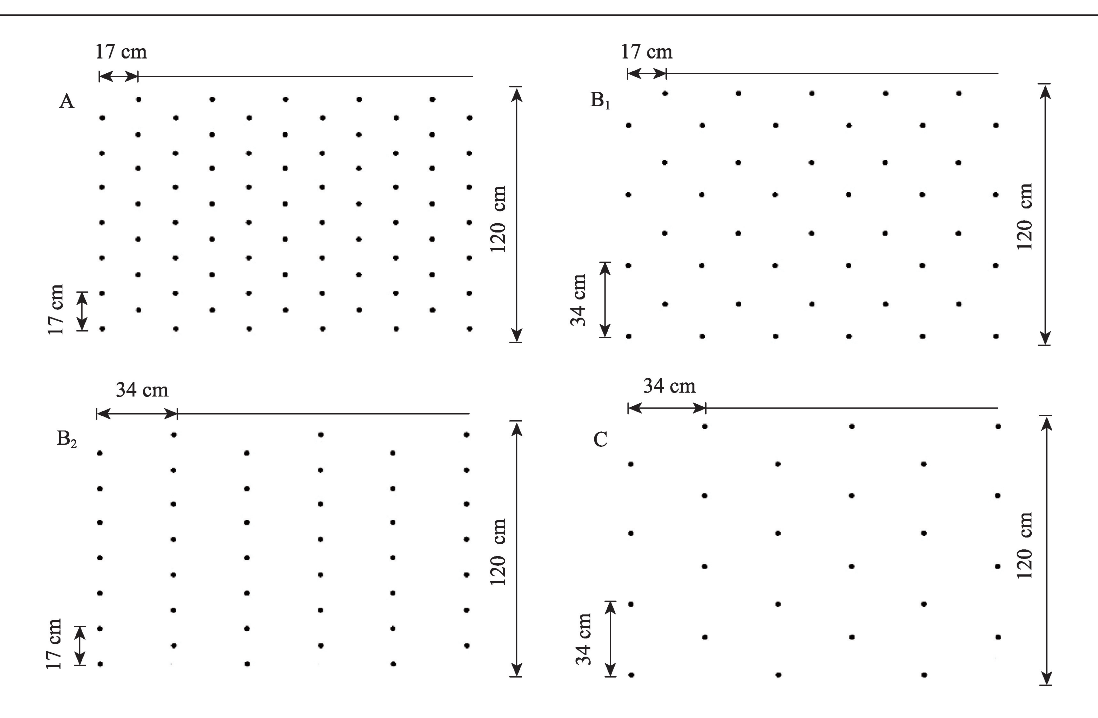
1.5 数据分析

有林带时测定的风速用U表示，无林带时测定的风速用U_0表示，对测定的风速进行标准化处理，处理后的风速为相对风速，记作U/U_0。利用Surfer 8.0软件(美国Golden Software公司)绘制U/U_0等值线图，图中，$U/U_0>1$的区域为风速加速区，$U/U_0<1$的区域为风速减速区。林带的防风效应用风速降幅表示，表达式为$\varepsilon=(U_0-U)/U_0\times100\%$，$\varepsilon$为正时，表明

表1 梭梭和仿真植物模型的特征参数

Tab. 1 Characteristic parameters of *Haloxylon ammodendron* and wind tunnel simulation plant models

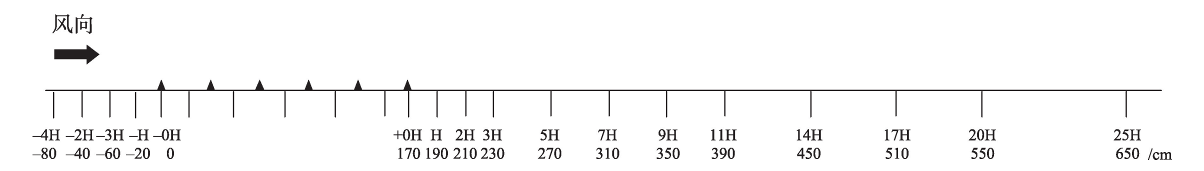
	株高/cm	平均冠幅/cm	冠厚/cm	冠层孔隙度/%	照片
梭梭(成年株)	300±45	228×215	215±50	28.5±4.5	
植物模型	20	15×15	14	≈28.5	



注：图中黑状点表示植株所在的位置；A表示株行距为17 cm×17 cm的林带；B_1表示株行距为34 cm×17 cm的林带；B_2表示株行距为17 cm×34 cm的林带；C表示株行距为34 cm×34 cm的林带。下同。

图1　林带设计示意图

Fig. 1　Schematic diagram of windbreak design



注：图中黑色三角表示林带所处的位置；负号表示测点位于林带的上风向；林带内部的测点位于相邻行的中间位置。

图2　林带风速测定范围及测点布设示意图

Fig. 2　Schematic diagram of wind speed measurement range and measurement point layout of forest belt

风速被降低，ε为负时，表明风速被增大。

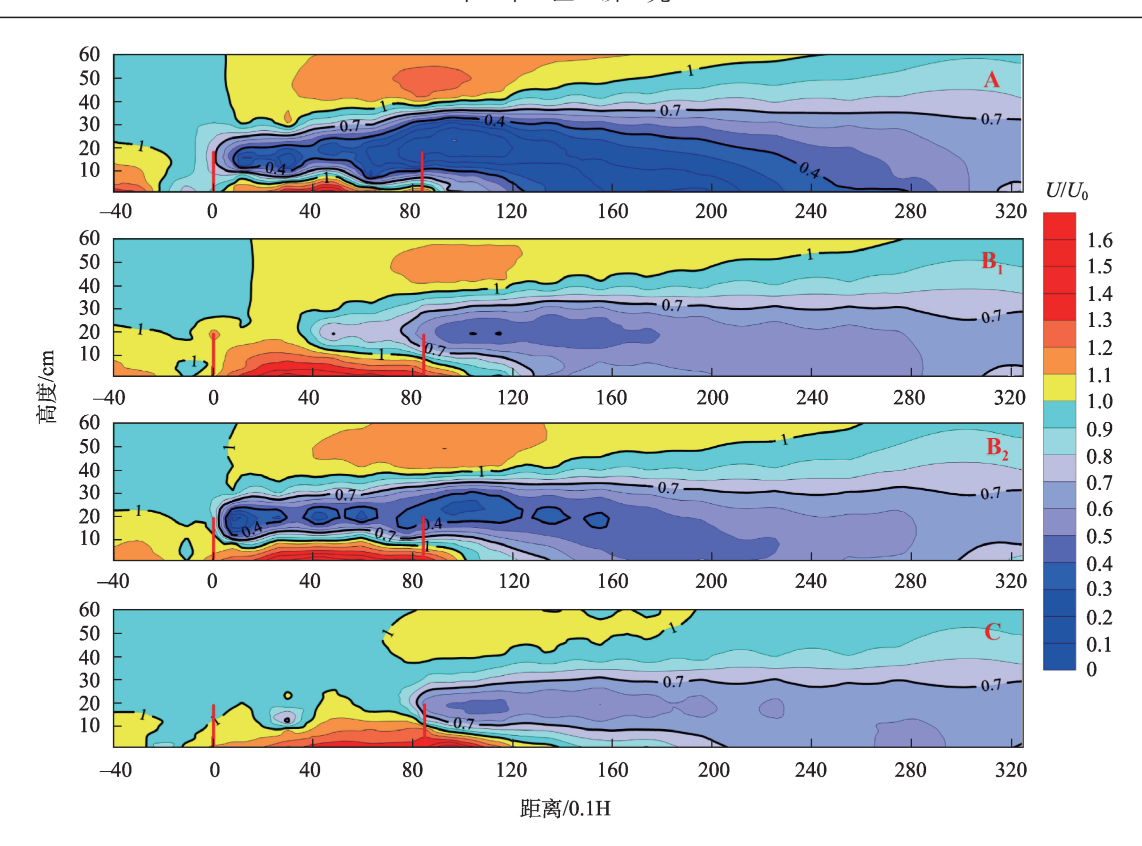
2　结果与分析

2.1　流场结构

植物附近的流场可划分为来流区、前部减速区、上部加速区、两侧加速区、后部减速区和回流区等6个区域[21]。因林带宽度远大于单株植物，流场结构被重新塑造，下面利用相对风速(U/U_0)详细分析林带流场结构。图3为相对风速U/U_0的等值线图，表2为图3相对风速取值范围的面积占比。由图3可知，4个林带均在林带前、冠下及冠上约40 cm以上的部分区域形成了$U/U_0>1$的风速加速区，在冠部及林带后形成了$U/U_0<1$的风速减速区。A、B_1、B_2、C林带的风速减速区的面积分别占流场总面积的78.06%、70.41%、74.36%、82.80%（表2），株距与行距不等的B_1、B_2林带的风速减速区面积小于株距与行距相等的A、C林带。4个林带中，A林带的减速幅度最为明显，$U/U_0<0.4$的弱风区面积达到了22.46%，B_1、B_2林带的弱风区面积则仅占0.73%和5.91%。虽然C林带风速减速区的面积最大，但其降低风速的幅度最不明显，U/U_0主要在0.7~1.0。

2.2　风速变化

当气流接近林带时，一部分气流因受阻向上偏移并翻越林带，另一部分气流进入林带。进入林带的气流可进一步被分为两部分，一部分从林冠空隙间受阻穿过，另一部分从林冠下的树干间通过。为了分析冠上、冠部、冠下3个不同高度层的风速变化



注：图中的2条红线表示林带所处位置；U/U_0>1为风速加速区，U/U_0<1为风速减速区；图中H=20，则0.1H=2 cm。

图3 相对风速（U/U_0）的等值线

Fig. 3 Contour map of relative wind speed U/U_0

表2 相对风速U/U_0的面积占比

Tab. 2 Area ratio of relative wind speed U/U_0

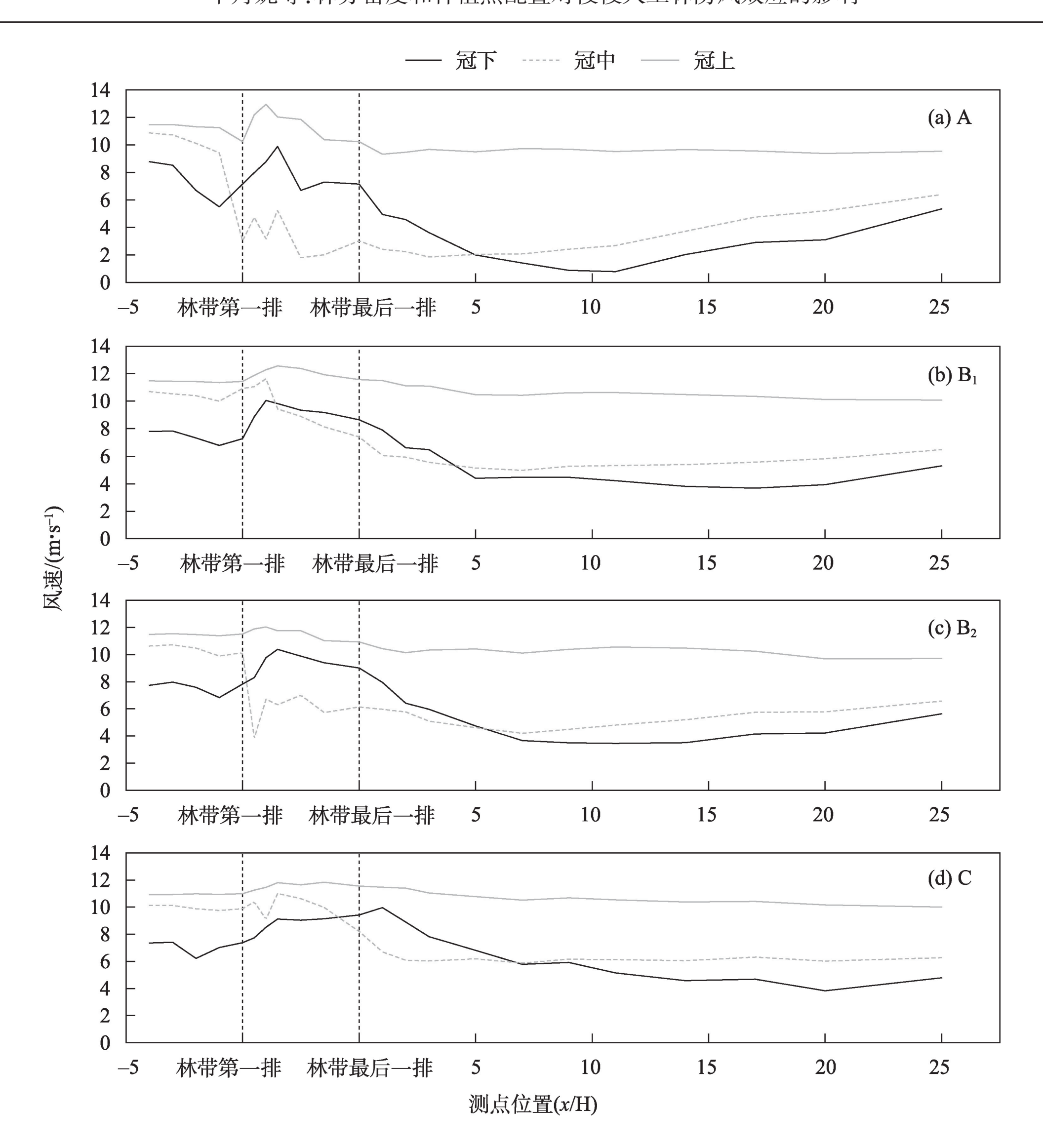
U/U_0	A	B_1	B_2	C
>1	21.94%	29.59%	25.64%	17.20%
0.7~1.0	29.71%	33.72%	33.50%	51.80%
0.4~0.7	25.89%	35.96%	34.95%	31.00%
<0.4	22.46%	0.73%	5.91%	0 %

注：相对风速U/U_0在4个取值范围的面积占比用百分比表示（%）；表中A表示株行距为17 cm×17 cm的林带；B_1表示株行距为34 cm×17 cm的林带；B_2表示株行距为17 cm×34 cm的林带；C表示株行距为34 cm×34 cm的林带。下同。

特征，对各测点冠上（30 cm、40 cm、60 cm），冠部（8 cm、13 cm、20 cm），以及冠下（1 cm、3 cm、5 cm）的平均风速值进行了统计分析。

由图4可知，在冠上，4个林带的风速变化趋势相似，当风到达林带时风速都保持在11 m·s^{-1}左右，在流经林带上方时速度有小幅增加，之后逐渐减小，整个过程中风速波动较小。在冠部，风到达林分密度最大的A林带时速度急剧降低，由−1H处的9.5 m·s^{-1}降低至林带第一行的2.7 m·s^{-1}，之后以低速通过林带并在林带后逐渐恢复；而当风到达林分密度最小的C林带时速度则先增后减，在2H之后保持相对稳定，维持在6~6.5 m·s^{-1}；B_1和B_2为密度相同但种植点配置不同的2个林带，其带内风速变化趋势及变化幅度相差较大，B_1林带内的风速表现为先增后减，B_2林带内的风速则表现为先减后增，但带后的变化趋势较为一致。在冠下，气流进入各林带后速度均先增后减，其中，A、B_1、B_2林带的最大风速值大约出现在林带内的第3~4行处，C林带则出现在林带后的1H处。图4还表明林分密度越大，冠下最小风速点越靠近林带，即A林带的最近（11H），C林带的最远（20H），B林带的最小风速点约在15H处。林带后的风速恢复有两个特点，一是密度越大，林带后风速降幅越大，但恢复也最快；二是4个林带在25H处的风速趋于一致，冠层以下风速均为对照风速的60%左右，且差异不大。

表3进一步给出了冠上、冠部及冠下的平均风速值，由表3可知，4个林带冠上的平均风速均在10 m·s^{-1}以上；在冠部及冠下，林分密度越大，风速越



注：图中两条虚线表示林带的分布区。下同。

图4　3个不同高度的平均风速变化

Fig. 4　Average wind speed changes at three different heights

表3　林带不同高度层的平均风速

Tab. 3　Average wind speed at different heights around the windbreaks

林带	平均风速/(m·s⁻¹)		
	冠上	冠部	冠下
A	10.48	4.54	5.28
B_1	11.21	7.76	6.74
B_2	10.88	6.63	6.73
C	10.98	8.04	7.12

小，风速由小到大的排序为A<B(B_1、B_2)<C；对于密度B，B_2型林带在冠部的风速(6.63 m·s^{-1})明显低于B_1型林带在冠部的风速(7.76 m·s^{-1})，在冠下两者没有明显差异。

2.3　风速降幅

以上风速变化分析表明林带对风速的影响存在明显的空间差异，为了进一步分析林带防风效应的空间异质性，以40 cm、13 cm、3 cm作为3个代表性高度，计算并绘制了风速降幅沿风向的变化图(图5)。由图5可知，在40 cm高度处，4个林带的风速降幅无论在带前还是带后均不超过25%。在13 cm高度处，4个林带的风速降幅在林带前均以负值为主，到达林带后被大幅提升，其中，风进入A林带后风速降幅立即提高至80%左右，持续至7H，之后开始下降；B_1、B_2、C林带的风速降幅在穿过林带后稳定在40%~60%，且整体上表现为B_2>B_1>C。在3 cm高度处，风速降幅沿主风向的变化明显，但带后最大风速降幅与13 cm高度处较为一致。总体来看，林带A的防风效应最好，林带C的防风效应最

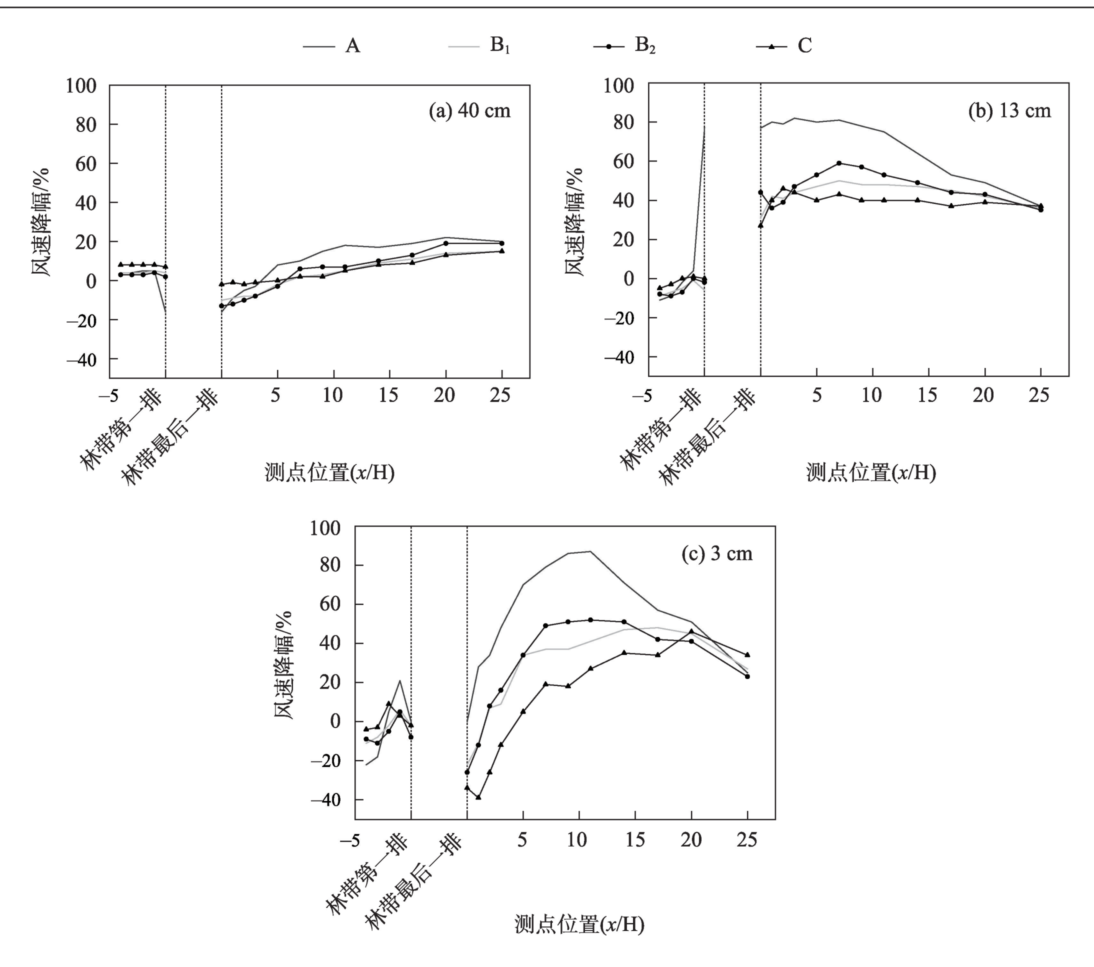


图5 3个高度风速降幅的变化特征

Fig. 5 Variation characteristics of wind speed decrease at three heights

差，林带B_2的防风效应大于林带B_1，防风效应排序为A>B_2>B_1>C。4个林带在25H处的防风效应趋于一致。

近地层的防风效应关系到地表的蚀积过程及微地貌的形成，因此是防护林研究的重点。对林带在株高20 cm以下的风速降幅求平均值(表4)，可知，A、B_1、B_2林带前近地层的风速比无林带时有所增大，风速降幅出现"负值"，C林带前近地层风速略有降低，其风速降幅为0.43%；防风效应主要体现在

表4 林带周围近地层(20 cm以下)平均风速降幅

Tab. 4 Decrease of average wind speed in near-ground layer (below 20 cm) around the windbreaks

林带	平均风速降幅/%	
	带前	带后
A	−4.06	63.15
B_1	−5.04	35.86
B_2	−5.81	38.66
C	0.43	24.37

林带后，在林带后25H范围内，A、B_1、B_2、C林带近地层的平均风速降幅分别为63.15%、35.86%、38.66%和24.37%，其比值为A:B:C≈6:3:2。

3 讨 论

林分密度与林带的防风效应密切相关。对于梭梭人工林，构成林带的植株个体的几何形状、空间构型等形态学特征一致，因此林分密度成为影响林带结构的关键因子。本研究中，当林分密度降低时，林带对风速的消减作用减弱，防风效应变差，其原因主要是由于在林分密度较小时用于消耗气流能量的枝叶量大幅降低所致。然而，本研究显示气流动能消耗引起的风速递减并不完全与枝叶量的减少量成正比，具体表现为当密度由A降低一半至B时，林带后近地层的风速降幅也降至A林带的1/2，但当密度继续降低一半，由B降至C时，林带后近地层的风速降幅只降低为B林带的2/3，这说明风速递减率与林分密度间并非线性关系，在较大密度时林

分密度的变化对防风效应的影响要大于在较小密度时的影响。

此外,本研究还发现,密度降低引起的防风效应的变化与由落叶植物沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)组成的林带防风效应从夏季到冬季的变化[7,22]具有相似性,即密度减小或落叶植物到了冬季均会扩大风速减速区的范围,同时减小了风速变化的幅度。所不同的是密度对风速的影响主要是通过改变植株个体间的距离实现,而落叶植物防风效应的季相变化则是通过植株冠层枝叶的脱落得以实现,二者具有异曲同工之处。

密度增大加速了林带下风向近地层风速的恢复速率,使最小风速点向林带靠近。最小风速点是风速降至最低并开始恢复的位置,该位置很可能是影响林带背风侧沙子沉积范围的重要动力因素,对认识林带后的积沙现象具有重要意义[23-24]。有关不同疏透度林带[7,12-13]和不同密度林带[5,25]防风效应的研究表明,疏透度越小或密度越大,林带背风侧最小风速点越靠近林带,本研究中密度变化引起的最小风速点的位置变化情况与上述研究结果相一致。这一变化的原因主要是由于林带作为一种障体,其通过影响气流通径和消耗气流能量两种方式使气流加速或减速。由于A林带的林分密度最大,当气流进入林带时,动量被枝叶大量消耗,冠部气流流速被大幅降低,而受阻被抬升到林带上方的气流加速也较快,这部分气流在到达林带下风向时,掺混作用使得动量很快被传递到近地层气流,所以,密度大的A林带背风侧近地层的风速恢复比B林带快,最小风速点出现在距林带较近的位置。同理,B林带最小风速点的位置比C林带提前出现。

种植点配置是影响气流通径的关键因子。当气流进入林带时,气流的向变和动能消耗受到气流与林带夹角、林分密度、林木个体疏透度、种植点位等多个因素的宏观控制。对于特定的林分,密度或疏透度控制了进入林带和翻越林带的气流流量[5,26],而种植点格局则对进入林带的气流的路径起到了引导作用,决定了对气流动量的吸收过程,并对局部气流的流速起到了加强或减缓的作用。显然,当气流以与林带走向相垂直的方向进入林带后,矩形配置会形成气流长驱直入的气流通道,而品字形配置则有利于形成网状流道,这一网状特征有2个作用,一是加强了林内气流的紊动性,增加了气流能量的消耗,二是减少了破土面和通风道的形成[18]。因此,从防护原理上讲,防护林建设应优先考虑品字形的种植点配置。由本研究可知,对于具有相同密度的林带,B_1林带和B_2林带种植点空间格局的不同引起的风速的差异主要表现在冠部,宽行距的B_2林带的防风效应明显大于窄行距的B_1林带,这一研究结果与赛克等[22]对疏透度相近而行距不同的灌木林防护效应的研究结果较为一致。究其原因,可能是由于当气流沿风向通过行距较大的林带时,气流在相邻行间形成的紊流强度较大,从而使较多的能量被消耗所致。因此,在营建防风固沙林时,在密度确定的情况下应优先选用"小株距,大行距"的品字形配置方式。

密度和种植点配置在实践中的应用。现阶段,我国沙区梭梭林的初植密度多在833~1666株·hm^{-2}间。本研究考虑了成林过程中的自然疏化,兼顾干旱区雨养梭梭林的土壤水分承载力,设计了1500株·hm^{-2}、750株·hm^{-2}、375株·hm^{-2}共3种密度的品字形林带,这3种密度可分别代表梭梭人工林的初植密度,早期种植的梭梭林在雨养条件下的保存密度,以及天然梭梭林的密度[17]。如不考虑梭梭个体的生长变化,则由本研究可知初植密度下梭梭林的防风效应最好,在雨养条件下经自然疏化后的梭梭林的防风效应约为初植密度的1/2,但仍优于天然林的防护效应。研究结果对干旱区造林和营林过程中的密度管理及不同种植点品字形林带防风效应的评价具有指导意义。

4 结 论

通过风洞模拟试验,对密度和种植点配置发生变化时的4个品字形林带的流场和防风效应进行了研究,得到以下主要结论:

(1) A、B_1、B_2、C林带的风速减速区的面积分别占流场总面积的78.06%、70.41%、74.36%、82.80%。林分密度越大,形成的弱风区(U/U_0<0.4)的面积越大。对于等密度的B_1和B_2林带,其风速加速区和风速减速区的分布及其强度与种植点的分布格局有关,B_2林带的弱风区的面积(5.91%)明显大于B_1林带(0.73%)。

(2) 4个林带冠层上方的风速均保持在11 m·s^{-1}左右且变化趋势一致;在冠层内,A林带的风速降幅

最大,最小风速约为2 m·s^{-1},B_1、B_2林带的风速整体上不低于6 m·s^{-1},C林带的风速不低于8 m·s^{-1};气流进入冠下后,流速先增后减,其中,A、B_1、B_2林带的最大风速值约出现在林带内的第3~4行处,C林带则出现在林带后的1H处。林分密度越大,冠下平均风速越小,但林带后近地层风速恢复速度越快,最小风速点越靠近林带,A、B_1、B_2、C林带的最小风速点分别在11H、15H、15H和20H处。

(3) 在13 cm高度处,A林带后风速降幅高达80%左右,持续至7H后开始下降;B_1、B_2、C林带后的风速降幅稳定在40%~60%。在冠下的3 cm高度处,风速降幅沿风向的变化明显,带后最大风速降幅与13 cm高度处较为一致。整体而言,林分密度越大,防风效应越好,4个林带的防风效应从大到小的排序为A>B_2>B_1>C。林带防风效应与林分密度间为非线性关系,3种密度的林带在背风侧近地层的风速降幅的比例关系为A:B:C≈6:3:2。

参考文献(References):

[1] Cheng H, He W, Liu C, et al. Transition model for airflow fields from single plants to multiple plants[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 266-267: 29-42.

[2] Wu X X, Zou X Y, Zhou N, et al. Deceleration efficiencies of shrub windbreaks in a wind tunnel[J]. Aeolian Research, 2015, 16: 11-23.

[3] 马彦军, 李雪琳, 马瑞, 等. 前高后低型防风固沙林防风效应及其对风向的响应[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 28-33, 39. [Ma Yanjun, Li Xuelin, Ma Rui, et al. Windproof efficiency of shelterbelt in high-low pattern and its response to wind directions[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 28-33, 39.]

[4] Ma R, Li J R, Ma Y J, et al. A wind tunnel study of the airflow field and shelter efficiency of mixed windbreaks[J]. Aeolian Research, 2019, 41: 100544.

[5] Ma R, Wang J H, Qu J J, et al. Effectiveness of shelterbelt with a non-uniform density distribution[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(12): 767-771.

[6] 李雪琳, 马彦军, 马瑞, 等. 不同带宽的防风固沙林流场结构及防风效能风洞实验[J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 936-944. [Li Xuelin, Ma Yanjun, Ma Rui, et al. Wind flow field and windproof efficiency of shelterbelt in different width[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(5): 936-944.]

[7] Ma R, Li J R, Ma Y J, et al. A wind tunnel study of the seasonal shelter efficiency of deciduous windbreaks[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(4): 913-922.

[8] Lampartová I, Schneider J, Vyskot I, et al. Impact of protective shelterbelt on microclimate characteristics[J]. Ekologia Bratislava, 2015, 34(2): 101-110.

[9] 袁素芬, 陈亚宁, 李卫红. 干旱区新垦绿洲防护林体系的防护效益分析——以克拉玛依农业综合开发区为例[J]. 中国沙漠, 2007, 27(4): 600-607. [Yuan Sufen, Chen Yaning, Li Weihong. Protective effect of shelterbelts in new-cultivated oasis of arid area: Case study in Karamay agricultural development region[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(4): 600-607.]

[10] 孙琳, 穆桂金, 周杰, 等. 策勒绿洲边缘新疆杨防护林疏透度的季相变化[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1181-1185. [Sun Lin, Mu Guijin, Zhou Jie, et al. Seasonal variation of shelterbeit porosity of *Populus alba* var. pyramdalis at the edge of Cele Oasis in the sourth of Tarim Basin[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(6): 1181-1185.]

[11] Perera M. Shelter behind two-dimensional solid and porous fences [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1981, 8(1-2): 93-104.

[12] Torita H, Satou H. Relationship between shelterbelt structure and mean wind reduction[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2007, 145(3-4): 186-194.

[13] Tuzet A, Wilson J D. Measured winds about a thick hedge[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 145(3-4): 195-205.

[14] 杨文斌, 董慧龙, 卢琦, 等. 低覆盖度固沙林的乔木分布格局与防风效果[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 5000-5008. [Yang Wenbin, Dong Huilong, Lu Qi, et al. Pattern of low-covered sand-fixing woodland and its windbreak effect[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(17): 5000-5008.]

[15] 杨红艳, 戴晟懋, 乐林, 等. 不同分布格局低覆盖度油蒿群丛防风效果[J]. 林业科学, 2008, 44(5): 6. [Yang Hongyan, Dai Shengmao, Le Lin, et al. Windbreak effects of different scheme *Artemisia ordosica* shrub for sand-fixation in low cover[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(5): 6.

[16] 梁海荣, 王晶莹, 卢琦, 等. 低覆盖度乔木两种分布格局内风速流场和防风效果风洞实验[J]. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1021-1028. [Liang Hairong, Wang Jingying, Lu Qi , et al. Windbreak effects and wind velocity flow field of low density arbor with tow spatial distribution patterns in wind tunnel[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(6): 1021-1028.]

[17] 杨文斌, 李卫, 党宏忠, 等. 低覆盖度治沙理论—原理、模式、与效果[M]. 北京: 科学出版社, 2016. [Yang Wenbin, Li Wei, Dang Hongzhong, et al. Theory of Low Coverage Sand Control-Principle Model and Effect[M]. Beijing: Science Press, 2016.]

[18] 翟明普, 马履一. 森林培育学(第4版)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2021. [Zhai Mingpu, Ma Lvyi, Silviculture M]. 4th ed. Beijing: China Forestry Press, 2021.]

[19] 李雪宁, 徐先英, 郑桂恒, 等. 石羊河下游人工梭梭林健康评价体系构建及应用研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 872-882. [Li Xuening, Xu Xianying, Zheng Guiheng, et al. A health evaluation of a *Haloxylon ammodendran* plantion in the Shiyang River lower reaches[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 872-882.]

[20] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学[M]. 北京: 科学出版社,

1995. [Liu Xianwan. Experimental Sandstorm Physics and Sandstorm Engineering[M]. Beijing: Science Press, 1995.]
[21] Judd M J, Raupach M R, Finnigan J J. A wind tunnel study of turbulent flow around single and multiple windbreaks, part I: Velocity fields[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1996, 80(1): 127–165.
[22] 赛克, 赵媛媛, 包岩峰, 等. 干旱半干旱区落叶期农田防护林防风效果的风洞试验研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 157–165. [Sai Ke, Zhao Yuanyuan, Bao Yanfeng, et al. Wind-tunnel test study of shelter effects of deciduous farmland shelterbelts in arid and semi-arid areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(5): 157–165.]
[23] 徐高兴, 徐先英, 王立, 等. 梭梭不同密度与配置固沙效果风洞模拟试验[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(9): 189–195. [Xu Gaoxing, Xu Xianying, Wang Li, et al. Sand-fix effects of *Haloxylon ammodendron* forests under the different densities and patterns under wind tunnel test[J]. Journal of Arid Land Resources on Environment, 2019, 33(9): 189–195.]
[24] 刘金苗, 李菊艳, 尹忠东, 等. 干枯骆驼刺对风沙流场影响的数值模拟研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1514–1525. [Liu Jinmiao, Li Juyan, Yin Zhongdong, et al. Numerical simulation study on the influence of dry *Alhagi camelorum* on the wind-sand flow field[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1514–1525.]
[25] 厉静文, Dosmanbetov D A, 郭浩, 等. 不同配置乔灌混交林防风效益的风洞试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 95–102. [Li Jingwen, Dosmanbetov D A, Guo Hao, et al. Wind tunnel experiment on protection benefits of arbor-shrub mixed forest belts in different configurations[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(11): 95–102.]
[26] Vigiak O, Sterk G, Warren A, et al. Spatial modeling of wind speed around windbreaks[J]. Catena, 2003, 52(3–4): 273–288.

Effects of density and plant point distribution on shelter efficiency of artificial *Haloxylon ammodendron* forest

NIU Danni[1], HAN Rong[1], MA Rui[1], WANG Zhenting[2], LIU Hujun[3], WEI Linyuan[3]
(1. College of Forest, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: This study aimed to study the shelter efficiency of *Haloxylon ammodendron* windbreak with different density and plant point distribution to provide scientific basis for optimizing the structure of windbreak in arid areas. With the field *Haloxylon ammodendron* as the prototype, windbreaks with three stand densities and four plant point distributions were designed, and their flow field and shelter efficiency were measured and analyzed by wind tunnel experiments. The corresponding label and “plant spacing × row spacing” of the windbreaks were as follows: A: 17 cm × 17 cm, B_1: 34 cm × 17 cm, B_2: 17 cm × 34 cm, and C: 34 cm × 34 cm. Results showed that (1) the area of wind speed deceleration region ($U/U_0 < 1$) accounted for 78.06%, 70.41%, 74.36%, and 82.80% of the whole flow field of A, B_1, B_2, and C windbreaks, respectively; the area of weak wind speed region ($U/U_0 < 0.4$) accounted for 22.46%, 0.73%, 5.91%, and 0%. (2) The higher the stand density, the lower the average wind speed under the canopy, but the faster the wind speed recovered at the leeside of windbreaks. The minimum wind speed was located at 11H, 15H, 15H, and 20H behind the A, B_1, B_2, and C windbreaks, respectively (H was the tree height). (3) The order of shelter efficiencies of the four windbreaks from large to small was $A > B_2 > B_1 > C$. The relationship between shelter efficiency and stand density was nonlinear. The ratio of wind reduction at the near surface was A:B:C≈6:3:2 behind the windbreaks. The density of afforestation should be determined based on the soil water carrying capacity in the practice of forestation. On this basis, the plant point distribution mode of “small plant spacing, large row spacing” should be preferred.

Keywords: windbreak and sand fixation forest; *Haloxylon ammodendron*; density; plant point distribution; flow field; shelter efficiency; wind tunnel test